

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta strojní**  
**Katedra mechanické technologie**

**Limitní parametry ohybu trubek s volným koncem**  
**Limit Parameters of Tube Bending with Open End**

**2012**

**Michal Pliska**

# Zadání bakalářské práce

Student:

**Michal Pliska**

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

2303R002 Strojírenská technologie

Téma:

Limitní parametry ohybu trubek s volným koncem  
Limit Parameters of Tube Bending with Open End

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor technologií ohýbání trubek za tepla
2. Sestavení relace proměnných ohýbání trubek za tepla
3. Specifikace limitních parametrů ohýbání trubek za tepla
4. Analýza parametrů ohybu trubek pro rozměrové a materiálové reprezentanty
5. Diskuze dosažených výsledků

Seznam doporučené odborné literatury:

BÁLEK, S. *Tepelne technické tabulky a diagramy*. Ostrava: VŠB, 1979, 137 s.

ČÁBELKA, J. a kol. *Mechanická technológia*. Bratislava: VSAV, 1967. s. 594÷599

STANGE, R. *Basic tube bending guide*. Denver: Tool for bending, Inc., 1963. p. 10


SEMIATIN, S. L. a kol. *Metals Handbook Ninth Edition. Vol. 14, Forming and Forging*. Ohio, Metals Park: ASM International, 1998, p. 665÷674

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012

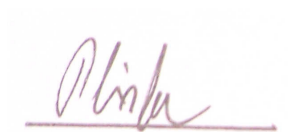
  
prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

**Prohlášení studenta:**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

A handwritten signature in red ink, appearing to be 'P. Hrubý', is written over a horizontal red line.

Datum odevzdání bakalářské práce: 21 .5. 2012

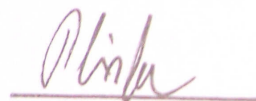
**Poděkování:**

Tímto děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Jiřího Hrubého, CSc. za odborné konzultace a rady, které mi pomohly při vypracování této práce.

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou ( bakalářskou ) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla a § 60 – školní dílo
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava ( dále jen „VŠB - TUO“ má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou ( bakalářskou ) práci užít ( § 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová ( bakalářská ) práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB – TUO, k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové ( bakalářské ) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou ( bakalářskou ) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy ( až do jejich skutečné výše ).
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů ( zákon o vysokých školách ), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 15.5.2012



podpis

Jméno a příjmení autora práce: Michal Pliska

Adresa trvalého pobytu autora práce: Ruda nad Moravou 210

## **Abstrakt**

Účelem této bakalářské práce byla simulace ohybu trubky při použití lokálního ohřevu. Práce sleduje deformace během ohybu, následné sestavení relace proměnných při ohýbání za tepla a analýzu parametrů při ohybu trubek pro rozměrové a materiálové reprezentanty. Simulace se provádí za pomoci speciálního softwaru – QForm. Výsledným produktem bakalářské práce by mělo být zhodnocení dané technologie ohybu pro zadanou trubku. Práce zkoumá limitní parametry při ohybu trubek za tepla.

## **Abstract**

The purpose of this work was the simulation of pipe bending using local heating. The work follows the deformation during bending, resulting assembly session variables when bending under heat and parameter analysis for bending tubes for dimensional and material representatives. The simulation is performed using special software - QForm. The final product thesis should be an assessment of the technology for a given pipe bends. The work examines the parameters of the limit bending tubes for heat.

## Seznam použitých zkratk a symbolů

$T_{\text{tav}}$	teplota tavení materiálu
$\alpha_1$	úhel potřebný pro překonání odpružení
$\alpha_2$	úhel po odpružení
$\beta$	úhel mezi $\alpha_1$ a $\alpha_2$
$M_{\text{OPL}}$	moment pro překonání odpružení
$M_{\text{OEL}}$	moment odpružení
$P_1$	rovina kolmá na $\alpha_1$
$P_2$	rovina kolmá na $\alpha_2$
$D$	průměr trubky
$s$	tloušťka stěny

# Obsah:

DATUM ODEVZDÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE: 21 .5. 2012 3  
PODĚKOVÁNÍ: 3

## 1 ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE 1

## 2 TEORETICKÁ ČÁST 1

- 2.1. MATERIÁLOVÍ REPREZENTANTI 1
  - 2.1.1. Základní rozdělení ocelí 1
  - 2.1.2. Charakteristika použitých materiálů 2
- 2.2. CHARAKTERISTIKY ZKOUŠENÝCH OCELÍ 4
  - 2.2.1. Ocel 11 353 4
  - 2.2.2. Ocel 11 523 5
  - 2.2.3. Ocel 11 378 5
  - 2.2.4. Ocel 12 050 6
  - 2.2.5. Ocel 15 128 7
- 2.3. TECHNOLOGIE OHYBU 7
  - 2.3.1. Technologie ohýbání 7
  - 2.3.2. Geometrie 7
  - 2.3.3. Proces ohýbání 8
  - 2.3.4. Napjatost při ohýbání 9
- 2.4. ZPŮSOBY OHÝBÁNÍ TRUBEK 9
  - 2.4.1. Ruční ohýbání trubek za pomoci přípravku [7] 9
  - 2.4.2. Ohýbání trubek navíjením [7] 10
  - 2.4.3. Ohýbání trubek s pomocným ohřevem [7] 10
  - 2.4.4. Ohýbání trubek osovou tlakovou silou s pomocným ohřevem [7] 10
  - 2.4.5. Protlačování trubek [7] 11
  - 2.4.6. Výplně trubek [7] 12
  - 2.4.7. Druhy výplní [7] 12
  - 2.4.8. Odpružení při ohýbání 13
  - 2.4.9. Omezení odpružení 14
  - 2.4.10. Deformace průřezu, neutrální osa 14
- 2.5. DALŠÍ TECHNOLOGICKÉ PROBLÉMY [3] 16
- 2.6. INDUKČNÍ OHŘEV 16
  - 2.6.1. Princip [6] 16
  - 2.6.2. Hloubka průniku tepla [6] 17
  - 2.6.3. Popis principu zahřívání [6] 17
- 2.7. CHLAZENÍ VODOU 18

## 3 PRAKTICKÁ ČÁST 18

- 3.1. TEPLOTA OHŘEVU. 18
- 3.2. VSTUPNÍ DATA A GEOMETRIE 19
  - 3.2.1. Vedení trubky 19
  - 3.2.2. Technologie 19
- 3.3. STRUKTURA RELACÍ – KONTROLNÍ (REGULAČNÍ), LIMITNÍ 19
  - 3.3.1. Struktura požadavků na vstupní a výstupní data analýz 21
- 3.4. POUŽITÝ SOFTWARE 23
  - 3.4.1. Hlavní oblasti použití [4] 23
  - 3.4.2. Historie softwaru [4] 23
  - 3.4.3. Vlastnosti [4] 23
- 3.5. VÝSLEDKY VÝPOČTŮ 24
  - 3.5.1. Ovalita 25

## Úvod:

### 1 Zadání bakalářské práce

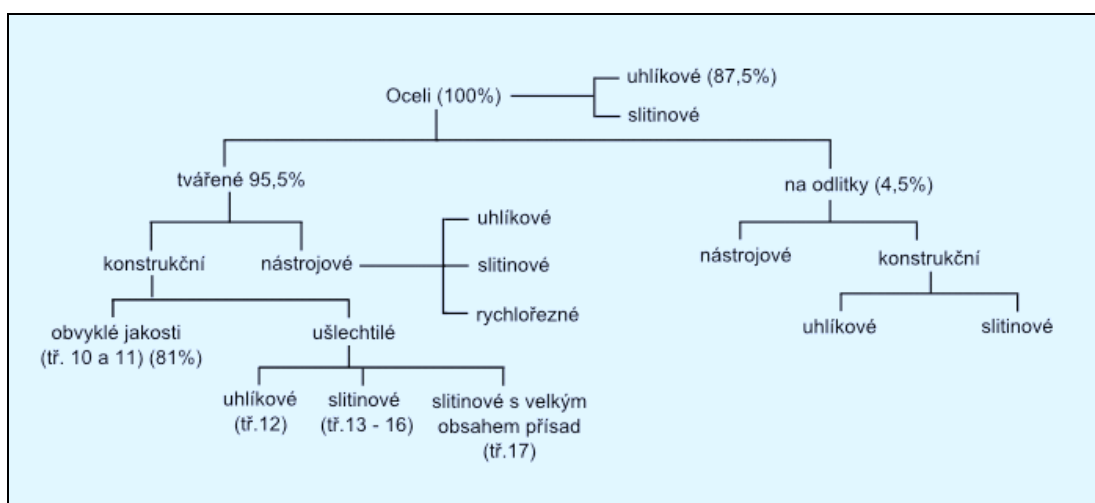
Výsledný produkt bakalářské práce byl zaměřen na technologii ohýbání trubek za tepla a zkoumání limitních parametrů při ohybu pro různé materiálové a rozměrové reprezentanty.

Obsah bakalářské práce je rozdělen do pěti hlavních kapitol. V části **Teoretické řešení** je popsána technologie ohýbání, testovaný materiál, lokální ohřev, pomocný software. V **Praktické části** se budu zabývat vymezením limitních parametrů a následného vyhodnocení. Ve **Zhodnocení** budou popisovány výsledky a přínos bakalářské práce.

### 2 Teoretická část

#### 2.1. Materiáloví reprezentanti

##### 2.1.1. Základní rozdělení ocelí



**Obr 1** Rozdělení a značení ocelí



Třída oceli	Druh oceli podle			Bližší údaje ( rozsah záruk chem. složení, charakteristika přísad )		
	jakost	použití	chem. složení			
10 XXX	obvyklé jakosti	konstrukční	uhlíkové	Bez záruky složení . ( Ve zvláštních případech se zaručuje max. obsah některých prvků v tavbovém vzorku a hutním výrobku. )		
11 XXX				Zaručuje se max. obsah C, P, S v tavbovém vzorku a hutním výrobku		
12 XXX	ušlechtilé		slitinové	Oceli uhlíkové		
13 XXX				Mn, Si		
14 XXX				Cr ( Mn, Si )		
15 XXX				Mo, W, V (Cr )		
16 XXX				Ni (Cr, W, Mo, V )		
17 XXX				Vysoce legované oceli: koroziivzdorné, žárovzdorné, žáropevné, speciální		
19 XXX	nástrojové	uhlíkové	oceli uhlíkové			
		slitinové	oceli slitinové a slitinové rychlořezné			

**Tab 1** Charakteristika ocelí 10 - 19

### 2.1.2. Charakteristika použitých materiálů

#### Konstrukční oceli obvyklých jakostí

V této skupině se nacházejí oceli třídy 10 a 11 vyráběné z finančně příznivějších surovin a výrobních způsobech. Vyznačují se celkem nízkou čistotou a mají v menším množství definované mechanické a technologické vlastnosti. Mechanické vlastnosti této skupiny ocelí jsou určovány výhradně obsahem uhlíku a technologií výroby.

#### Oceli třídy 11 [9]

U těchto ocelí je zaručen určitý obsah fosforu a síry (kromě ocelí automatových). Tyto oceli se vyrábí s obsahem uhlíku do 0,65% a jsou v jakostech vhodných pro tváření. Jejich vlastnosti jsou odstupňovány v závislosti na obsahu uhlíku od nejmenší pevnosti v normalizačně žíhaném stavu 340 MPa (11 340 – obsah 0,1%C) do 900 MPa (11 901)

Ocel 11 340 - dobře svařitelná, tvárná za tepla i za studena, tuto ocel lze cementovat.

Ocel 11 500 jde o nejběžnější ocel pro strojní součásti, jež lze zušlechťovat (0,3%C) min. pevnost v normalizačně žíhaném stavu 500 MPa. Zušlechťuje se nejvýše na pevnost okolo 700 MPa. Použití: svorníky, ozubená kola, hřídele.

Oceli 11 600, 11 700, 11 800 - části vystavené značným měrným tlakům a opotřebením (klíny, vodící hřídele, včetně lisů)

Oceli 11 378, 11 483, 11 523 a 11 583 jsou označeny jako oceli jemnozrnné. Mají zvýšenou mez kluzu.

Zvláštní oceli jsou tzv. automatové (11 109, 11 110, 11 120, 11 121, 11 140), které obsahují až 0,2 % S. Síra je vázána zvýšeným obsahem manganu (kolem 1%). Tyto oceli dosahují dobré obrobitelnosti s kvalitním povrchem při velké řezné rychlosti při snadné lámavosti třísky.

### **Oceli třídy 12 [9]**

Jedná se o ušlechtilé uhlíkové konstrukční oceli, u kterých je zaručeno kompletní chemické složení, oceli jsou tzv. uklidněné. Tyto oceli neobsahují žádné legury. Mají značné použití podle obsahu C (0,07 – 0,9), tepelným zpracováním lze získat velké množství užitečných vlastností.

Oceli třídy 12 určené k cementování mají 0,06 až 0,2 % C a dodávají se ve stavu přírodním (pouze válcované popř. kované).

Oceli třídy 12 určené k zušlechťování mají 0,25 až 0,7 %C. Jsou prokalitelné až do průměru 40 mm.

#### ***Rozdělení:***

- oceli s odstupňovanou pevností (používané v zušlechtěném stavu)
- oceli k tažení za studena
- oceli s nízkým obsahem uhlíku určené k cementování (12 010, 12 020)
- žárovevné oceli
- pružinové oceli
- oceli pro nosná lana

### **Oceli třídy 15 [9]**

Jsou legovány kombinací chromu s vanadem nebo molybdenem popř. wolframem. Používají se hlavně na vysokotlaké kotle a trubky, na součásti parních turbin a jiné součásti namáhané za tepla, neboť tyto oceli jsou žárovevné, tj. mají vysokou mez tečení. Kromě toho se tyto oceli používají pro velmi namáhané strojní

součásti, a to buď jako oceli cementované, zušlechtěné, povrchově kalené nebo nitridované, zejména ve stavbě motorových vozidel, letadel, aj.

15 124	- cementování
15 230, 15 241, 15 261	- vhodné pro povrchové kalení
15 330, 15 340	- oceli k nitridování
15 230, 15 231	- dobře svařitelné a používají se na svařované součásti letadel

## 2.2.Charakteristiky zkoušených ocelí

### 2.2.1. Ocel 11 353

#### Charakteristika:

Jedná se o oceli s feriticko-perlitickou strukturou. Proces svařování u této oceli je ovlivňován m.j. fyzikálními a chemickými vlivy, které určují vlastnosti svarového spoje. Je vhodná pro svařování. Avšak oceli, které obecně nepodléhají koroznímu praskání, prokázaly v oblastech svárů až 70% výskyt trhlin, které vznikají právě v oblasti termického ovlivnění.

#### Vhodnost použití:

Na svařované, staticky i mírně dynamicky namáhané součásti konstrukcí a strojů. Vhodná na kované, lisované, tažené, svařované součásti. Na potrubí a konstrukce vtoků vodních turbín.

C	Si	Mn	Ni	P	S
max. 0,16	max. 0,35	max. 1,2	max. 0,3	max 0.025	max. 0,02
Cr	Mo	V	Nb	Ti	Cu
max. 0,3	max. 0,08	max. 0,02	max. 0,01	max. 0,04	max. 0,3

**Tab 2** Chemické složení %

Jmenovitá tloušťka (mm)	16	16 – 40	40 – 60
Re – Minimální mez kluzu (MPa)	235	225	215
Rm – Pevnost v tahu (MPa)	360 – 500		

**Tab 3** Mechanické vlastnosti

### 2.2.2. Ocel 11 523

#### Charakteristika:

Nelegovaná konstrukční jemnozrnná ocel vhodná ke svařování. Svařitelnost zaručena až podmíněna.

#### Vhodnost použití:

Mostní a jiné svařované konstrukce, ohýbané profily, svařované konstrukce z dutých profilů a součásti strojů, automobilů, motocyklů a jízdních kol. Součásti tepelných energetických zařízení a součásti tlakových nádob vyrobených z tyčí.

Jmenovitá tloušťka $\leq 40(\text{mm})$ C max = 0,20							
Jmenovitá tloušťka $\leq 30(\text{mm})$ CEV max = 0,45							
C	Si	Mn	P	S	N	Cu	CEV
max 0,22	max 0,55	max 1,6	max 0,035	max 0,035	max 0,012	max 0,55	0,47

**Tab 4** Chemické složení %

Jmenovitá tloušťka (mm)	16	16 – 40	40 – 63	63 – 80	80 – 100	100 – 125
Re – Minimální mez kluzu (MPa)	355	345	335	325	315	295
Jmenovitá tloušťka (mm)	3 – 100			100 – 125		
Rm – Pevnost v tahu (MPa)	470 – 630			450 – 600		

**Tab 5** Mechanické vlastnosti

### 2.2.3. Ocel 11 378

#### Charakteristika:

Konstrukční ocel, tavná svařitelnost zaručena.

#### Vhodnost použití:

Svařované součásti menších tlouštěk namáhané staticky popř. i mírně dynamicky. Svařované mostní, jeřábové, málo namáhané nýtované konstrukce, součásti tepelných a energetických zařízení, tlakové nádoby do 300°C. Součásti z plechů pro vodní turbíny a jejich příslušenství. Spojky a podvozky vagónů.

#### Poznámka

- Druh oceli podle způsobu výroby - uklidněná jemnozrnná
- Barevné značení dle ČSN 42 0010 - černá/zelená
- Třída odpadu dle ČSN 42 0300 - 001

Jmenovitá tloušťka $\leq 40(\text{mm})$ CEV max = 0,35						
C	Mn	P	S	N	Cu	CEV
max 0,17	Max 1,4	max 0,035	max 0,035	max 0,012	max 0,55	max 0,38

**Tab 6** Chemické složení %

Značka oceli	Stav	Pevnost v tahu Rm	Tažnost
		MPa	%
11 353	.20	275 – 410	26
	.21	285 – 420	22
	.22	315 – 450	16
	.23	375 – 520	
	.24	450 – 610	
	.25	590 – 785	

**Tab 7** Mechanické vlastnosti

#### 2.2.4. Ocel 12 050

##### Charakteristika:

Ušlechtilá uhlíková ocel k zušlechťování,. Určena pro povrchové kalení.

##### Vhodnost použití:

Určena pro rozměrné výkovky. Uklidněná ocel, vhodná na hřídele těžních strojů, turbokompresorů, karuselů apod., na větší ozubená kola, šneky, ozubené věnce, rotory šroubových kompresorů, ojnice, pístnice, vřetena, plunžry, písty kompresorů, čepy, šrouby, stavěcí šrouby, dopravní válečky, vodící čepy, lamely spojek, lůžka, páky, zarážky, kolíky, různé spojovací součásti, posouvací vidlice, držáky, unašeče satelitů, vahadla, západky, kované svorníky tlakových nádob, upínací a stavebnicové části nástrojů, vrtací tyče, frézovací trny.

Značka oceli	Stav	Pevnost v tahu Rm	Tažnost
		MPa	%
12 050	.30	450 - 610	19
	.31	470 - 640	13

**Tab 8** Mechanické vlastnosti

C	Mn max.	Si max.	P max.	S max.	Ni max.	Cr	Cu max.
0,42	0,50	0,17	0,04	0,04	max. 0,30	max. 0,25	0,30
0,50	0,80	0,37					

**Tab 9** Chemické složení %

### 2.2.5. Ocel 15 128

#### Charakteristika:

Obrobitelnost a svařitelnost dobrá. Vysoká odolnost materiálu proti vysokým teplotám 600-1200 ° C při dlouhodobé práci, a má vyšší teplotní pevnost, dobrou odolnost proti oxidaci, odolnost proti korozi, lomovou houževnatost.

#### Vhodnost použití:

Široce používaný materiál v letectví, vesmírném programu, ropný, chemický průmysl, důležité součásti lodí.

Materiál		C	Cr	Mn	Mo	P	Si	V	S
15 128	min.	0,10	0,50	0,45	0,40		0,15	0,22	
	max.	0,18	0,75	0,7	0,60	0,040	0,40	0,35	0,040

**Tab 10** Chemické složení %

Materiál	Modul pružnosti (GPa)	Pevnost v tahu (MPa)	Mez kluzu (MPa)
15 128	190-210	515	275

**Tab 11** Mechanické vlastnosti

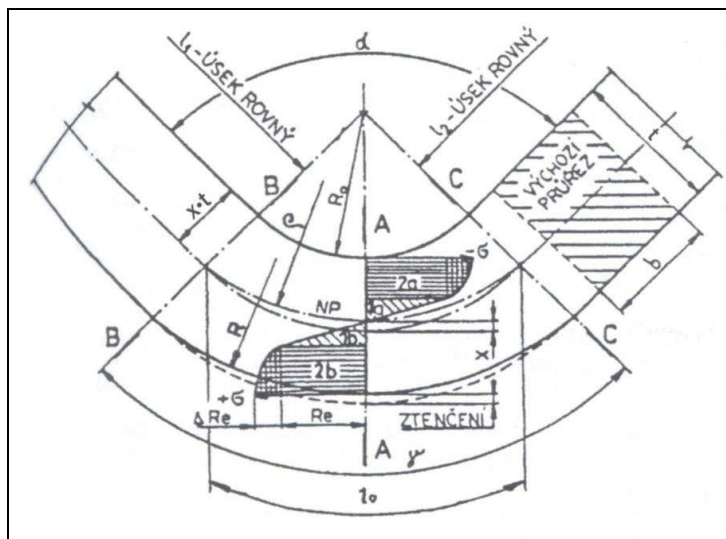
## 2.3. Technologie ohybu

### 2.3.1. Technologie ohýbání

Ve strojírenství jde o hojně používanou technologickou operaci. Při této operaci vzniká napětí, které je vytvořeno od působící ohybové síly. Tato síla má za následek buď ohýbání nebo naopak rovnání. Mění se křivost součástí. Jako polotovary mohou sloužit: drát, tyč, nějaký profil, plech nebo trubka. Při procesu ohýbání nedochází k příliš velkým změnám průřezu.

### 2.3.2. Geometrie

Trubka může být ohýbána v různých úhlech a směrech. Vedlejší účinek při ohýbání materiálu je změna tloušťky stěny. Stěna na vnitřním poloměru trubice se stává silnější a vnější tenčí.



**Obr 2** Schéma ohýbání

### 2.3.3. Proces ohýbání

Většinou se ohýbá pomocí nástrojů k tomu určených. Jedná se o speciální nástroje a stroje na ohýbání za studena, tzv. jedná se o teploty o hodnotách řádově nižších, než je teplota rekrytalizace ( $T \leq 0,3 \cdot T_{tav}$ ). Ohýbání, které probíhá za vyšších teplot než je teplota rekrytalizace se provádí, jestliže jde o polotovary s velkým průřezem, tvrdý nebo naopak křehký a s vysokou pevností.

Proces ohýbání trubek začíná zatížením trubky v ohýbačce a upíná se na místo mezi dvěma držáky a upínací blok. Tento proces zahrnuje používání mechanické síly. U některých druhů ohýbání trubek lze umístit trn přímo dovnitř trubice z důvodu zabránění případnému hroucení trubky. Kladka bývá většinou vyrobena z hliníkové slitiny, tj. měkčí mosaz, aby nedošlo k poškrábání nebo poškození ohýbaného materiálu. Hodně z nástrojů je vyrobeno z kalené oceli.

#### Průměr nad 1,5 - 2 D

Jedná se o druh tzv. běžného ohýbání. Zhotovení jednoduchých ohybů s rádiusem pohybující se okolo 1,5 - 2 násobek průměru trubky a stěnou nad 2 mm většinou nebývá velkým problémem. Stačí použít standardní nástroje. Omezujícím faktorem jsou pouze výrobní možnosti stroje.

#### Průměr pod 1,5 - 2 D

U ohybů s rádiusem okolo 1,5 - 2 násobku průměru trubky a stěnou pod 2 mm je situace značně odlišná a složitější. Je zapotřebí použít sadu speciálně určených

nástrojů, které zabezpečí správné provedení ohybu. To se týká zpravidla tenkostěnných materiálů. Zde je zapotřebí provést praktické zkoušky.

#### 2.3.4. Napjatost při ohýbání

Během ohýbání dochází v místě ohybu v materiálu k nehomogenní lokální plastické – pružné deformaci.

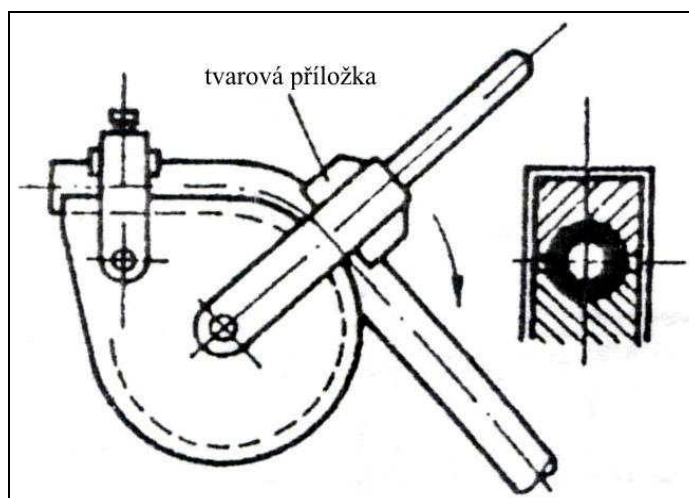
Na velikost deformace má vliv nejenom kvalita ale i tloušťka materiálu, orientace ohybu vzhledem ke směru válcování, velikost ohybových momentů a v neposlední řadě poloměr ohybu. Deformace je vytvořena v místě nejvyššího ohybového momentu. Technologie ohýbání rozeznává dva druhy ohybu a to ohyb pomocí vnějších momentů a ohyb pomocí lokálních sil.

Při ohybu se poloměr zmenšuje až na minimální hodnotu. Tato hodnota leží na rozmezí mezní hodnoty deformace za studena. Proti tomu při rovnání se naopak poloměr zakřivení zvětšuje. Hlavním parametrem při ohýbání jsou tahová napětí. Kritické hodnoty těchto napětí jsou nejčastěji nižší než je pevnost materiálu v tahu.

### 2.4. Způsoby ohýbání trubek

#### 2.4.1. Ruční ohýbání trubek za pomoci přípravku [7]

Způsob používaný k ohýbání tenkostěnných trubek do malých průměrů a to do 20mm a minimálního poloměru ohybu  $R_{\min} \geq 2,5 \cdot D$ . Ohýbaná trubka se připevní za pomoci upínky ke zvolenému segmentovému kotouči. Následně se pomocí ohybové páky s tvarovou příložkou ohne podle tvaru kotouče.



**Obr 3** Ohýbání trubky v přípravku



#### **2.4.2. Ohýbání trubek navíjením [7]**

Jde o efektivnější metodu ohýbání trubek než je metoda ručního ohýbání. Tato metoda je určena pro trubky průměrů o rozměrech  $12 \div 80 \text{ mm}$ . Operace se provádí na strojních ohýbačkách. Princip spočívá v navíjení trubky na segmentový kotouč. Ten musí spolu s vodící lištou odpovídat profilové drážce vnějšího průměru trubky. Vodící lišta může být dvojího druhu. Může být upevněn napevno nebo se může jednat o tzv. pohyblivou. Napřed se trubka procházející přes vodící lištu upevní k segmentovému kotouči. Následně dochází k postupnému otáčení kotouče a tím k plynulému navíjení trubky na tento kotouč. Konečný tvar ohýbané trubky se odvíjí od tvaru kotouče. Vložením mechanicky ohebných vložek (kovové, silikonové, pružiny nebo polyuretanové vložky) a kalibračních trnů do trubek se dá zlepšovat kvalita ohybu. Vložený kalibrační trn nejčastěji zasahuje až do místa ohybu. Pro trubky v průměrech do  $D \leq 50 \text{ mm}$  je určen průměr trnu o  $(0,5 \div 0,6) \text{ mm}$  nižší než je vnitřní průměr trubky. Nesporně důležitým faktorem je správné mazání trnu. Mazání lze dělat ručně přímo v místě ohybu nebo za pomoci dutého trnu, u něhož se mazivo dostává přes dutinu přímo do míst s největším třením. Na první místo nejčastěji používaných maziv se řadí mazlavé mýdlo a další speciálně určená maziva.

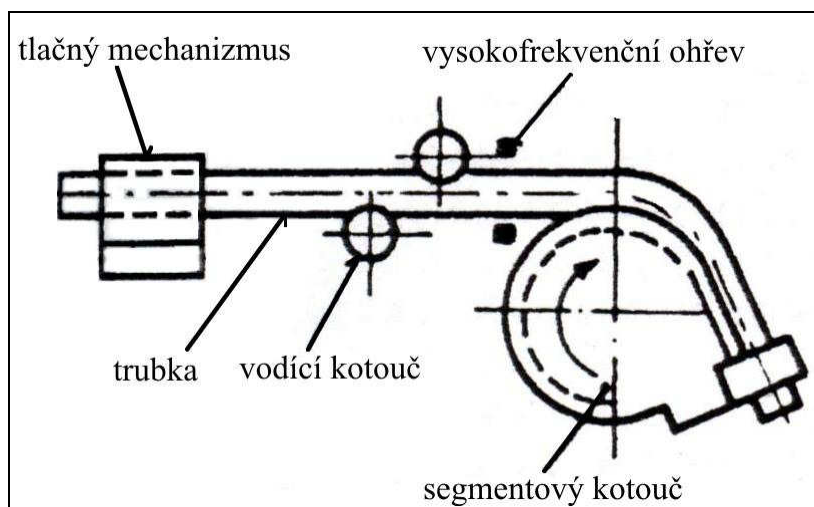
#### **2.4.3. Ohýbání trubek s pomocným ohřevem [7]**

Ohřev se používá pokud danou součást nelze ohnout některým ze způsobů zastudena. Trubka se upevní do pomocného přípravku a v místě ohybu se ohřívá. Ohřev se může provádět jak kyslíko – acetylenovým plamenem tak i za pomoci elektrického proudu. Důležité u této meto je, aby se více ohřívala vnitřní strana ohýbané trubky. Výhodou této metody jsou menší hodnoty úhlu odpružení a s porovnáním s ohýbáním zastudena menší ohýbací síla. Nevýhody této metody jsou nízká efektivita práce, horší kvalita povrchu, vyšší výrobní nároky spojené s ohřevem a náročná příprava na ohýbání.

#### **2.4.4. Ohýbání trubek osovou tlakovou silou s pomocným ohřevem [7]**

Ohýbání trubek na běžných konvenčních strojích dochází při ohýbacím procesu k nežádoucímu jevu. Na vnějším poloměru dochází ke ztenčování tloušťky stěny, které může dosahovat i 25%. Díky kombinaci vysokofrekvenčního ohřevu v určené oblasti trubky společně s tlakem se podstatně snižuje velikost ztenčení stěny u této technologie. Technologie metody je příbuzná metodě navíjecí. Princip metody: Trubka prochází přes vodící kotouče, tlačný mechanismus, vysokofrekvenční ohřev,

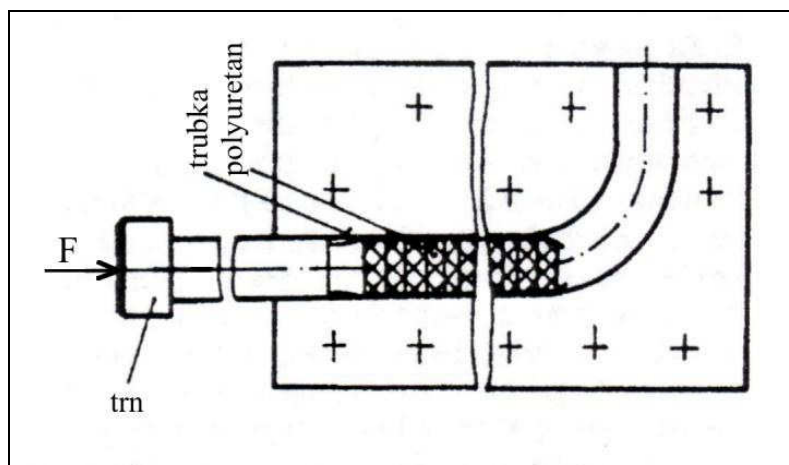
ten může být implantován i do vodících kotoučů. Trubka je postupně navíjena na segmentový kotouč, ten je pevně mechanicky upevněn.



**Obr 4** Navíjení trubky osovou tlakovou silou s ohřevem

#### 2.4.5. Protlačování trubek [7]

Jedná se o další ze způsobů ohýbání trubek zastudena. Popis metody: Nejdříve se koncová část trubky zúží a upne do matrice, což způsobí uzavření konce trubky. Následně se do trubky vsune několik polyuretanových kroužků a celý tento komplet se vloží do dělené zápustky. Tato zápustka je sešroubována šrouby a má na sobě vyfrézován geometrický tvar budoucího profilu ohnuté trubky. Trn, který dosedne na polyuretanové kroužky, se postupně vtlačuje do trubky. Následně začne narůstat třecí koeficient mezi vnitřní stěnou trubky a kroužky. Když se tento koeficient zvětší nad koeficient tření mezi vnější stěnou trubky a zápustky dochází k posunutí trubky a následnému ohýbání podle zápustky. Při neustálém působení trnu na trubku vzniká tlakové napětí. Působením tlaku dochází k nahuštění tloušťky stěny, které může dosáhnout hodnoty až 30%. Mimo jiné tato metoda potlačuje další nepříznivý efekt. Jedná se o zvlnění na vnitřním poloměru. Jev je odstraněn díky vysokému tlaku polyuretanu na vnitřní stěnu trubky.



**Obr 5** Protlačování

#### 2.4.6. Výplně trubek [7]

Použitím výplně se zajišťuje stabilizace kruhového průřezu a zabraňuje se vzniku defektů. Určující podmínky zda použít výplň jsou:

$$1) \quad \frac{t}{D} \geq 0,1 \wedge \frac{R_{\min}}{D} \geq 3$$

kde:  $t$  – tloušťka stěny trubky [mm]

$D$  – vnější průměr ohýbané trubky [mm]

$R_{\min}$  – minimální poloměr ohybu [mm]

Aby byla výplň použita musí obě podmínky platit současně. Pokud je vše splněno může se říct, že se jedná o optimální podmínky pro ohýbání a není potřeba výplň použít. Jestliže výše uvedené podmínky nejsou splněny je použití výplně naprosto nutné.

#### 2.4.7. Druhy výplní [7]

Použité výplně při ohýbání trubek se dají rozdělit na mechanické, elastické, tuhé, tekuté a sypké. Jednotlivé druhy výplní jsou vhodné na jim určené druhy materiálů. Tuhé a lehce tavitelné výplně ( kalafuna, ledek draselný, dusičnan vápenatý, atd. ) se používají především pro ohýbání krátkých ocelových trubek s větším průměrem. Výhodou těchto výplní je jejich snadné odstranění po ohnutí. Odstraňují se pomocí výplachu horkou vodou, která dosahuje teploty  $70 \div 80^{\circ}\text{C}$ . Nevýhodou je křehkost po ztuhnutí. Tuto nevýhodu se podařilo odstranit pomocí použití plniva na bázi

lehkotavitelné slitiny. Složení této slitiny se skládá z vizmutu, hutnického měkkého olova, čistého cínu a kadmia. Před nalitím do trubky se slitina ohřeje na 80°C a až poté se nalije. Po dokončení ohnutí a ztuhnutí se slitina vyplaví v teplé vodě o teplotě 90°C. Nesmírnou výhodou je několikanásobné použití.

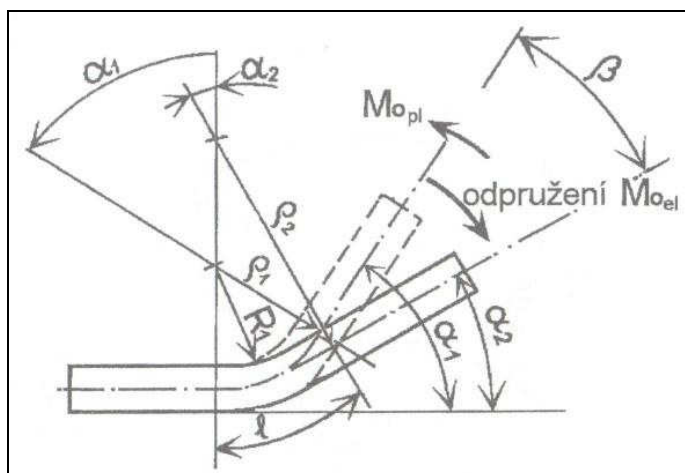
Pro ruční ohýbání se nejčastěji využívá jako výplň hydraulický olej. Ten je v trubce pod tlakem ( 25 ÷ 40 MPa ). Výhodou je snadné odstranění z trubky. Na koncích trubky musí být umístěno šroubování. Pro plnění je nutno připojit zařízení, které zajistí požadovaný tlak.

Mechanické výplně se rozdělují na polyuretanové, silonové, kovové vložky, které se skládají z kulových, polokulových, válcových segmentů. Také je možno použít hustě vinuté pružiny.

Při ohýbání trubek z neželezných a barevných kovů se nejčastěji využívají jednoduché ohýbací přípravky, protože nedochází během ohýbání k velké deformaci ani vevnitř trubky ani na vnějším povrchu. Z těchto důvodů není nezbytně nutné používat výplně.

#### 2.4.8. Odpružení při ohýbání

V oblasti ohybu je pružně - plastický stav deformace, kdy proti trvalým deformacím vnějších vrstev působí ohybovým momentem pružně deformované vnitřní vrstvy. Tento jev se vyskytuje i v případě trvalých deformací všech vrstev materiálu o tloušťce  $t$ , protože pro každou plastickou deformaci platí zákon pružného odlehčení. Po ukončení ohybu, kdy nepůsobí síly zatěžování, popsáný jev vyvolá změnu křivosti, resp. úhlu ohybu o tzv. úhel odpružení. Na celkovém odpružení se podílí také nerovnoměrnost rozložení deformací. Způsobená nehomogenní strukturou reálného materiálu v deformovaných vrstvách.



**Obr 6** Odpružení při ohybu

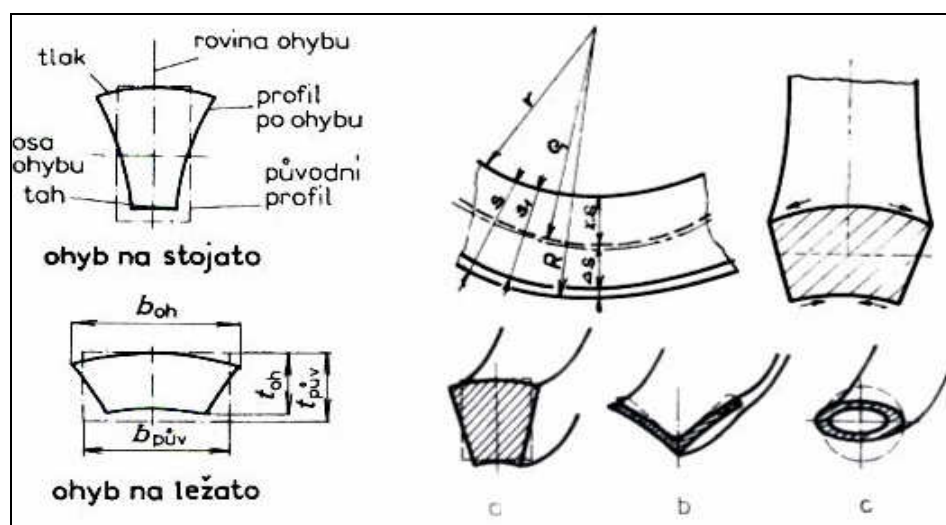
#### **2.4.9. Omezení odpružení**

Materiál se ohne větším úhlem a to o hodnotu odpružení  $g$ , který se určuje podle empirických vzorců nebo z tabulek. Nástroj musí být navrhnout s korekcí o úhel  $g$ , používá se kalibrace, tzn. zvětší se ohýbací síla na závěru ohybového cyklu, dochází k místní plastické deformaci. Hodnota odpružení v místě ohybu se snižuje a případně může zmizet úplně. Velikost následného odpružení je závislá na tloušťce a vlastnostech ohýbaného materiálu, poměru tloušťky materiálu na poloměru ohybu, velikosti ohybového úhlu, způsobu ohybu a velikosti ohybového úhlu. Velikost odpružení lze stanovit početně i za pomoci diagramů, které vycházejí z praktických měření a zkoušek.

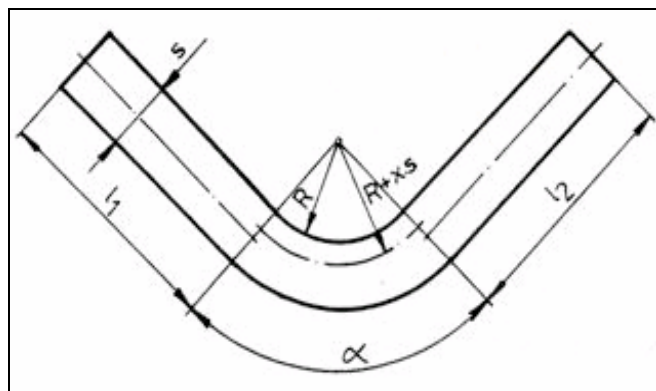
#### **2.4.10. Deformace průřezu, neutrální osa**

Při ohybu se deformuje průřez, vyšší průřezy jsou deformovány více, než průřezy menší. U širokých pásů nedochází k deformaci proto, protože proti deformacím v příčném směru působí odpor materiálu velké šířky vzhledem k jeho malé tloušťce. Vrstvy kovu na vnitřní straně ohybu jsou v podélném směru stlačovány, zkracovány a roztahovány v příčném směru. Vrstvy kovu na vnější straně ohybu se roztahují a prodlužují v podélném a stlačují se v příčném směru. [3]

V blízkosti střední části průřezu ohýbaného materiálu se vyskytují malá tahová napětí a dosahují velmi malých hodnot, menší než je hodnota meze kluzu. V přechodu mezi pásmy jsou vlákna bez napětí a bez deformace. Spojnice pásem tvoří tzv. neutrální osu, ve které se nevyskytují žádná napětí. Při ohýbání se tudíž neprodlouží ani nezkrátí. Neutrální osa je na začátku uprostřed průřezu, při ohybu se posouvá směrem k vnitřní straně ohybu [3]. Osa těžiště není totožná s neutrální osou ohýbaného materiálu.



**Obr 7** Deformace průřezu během ohýbání pro rozdílné výšky a profily



**Obr 8** Posunutí neutrální osy v místě ohybu

Z délky neutrální osy a z délek rovných úseků se vypočítá rozvinutá délka polotovaru před ohybem. Málo patrný rozdíl je u tenkých plechů, ovšem při ohýbání tlustých plechů se s tímto rozdílem musí počítat. Vzdálenost  $x$  určuje charakter polohy neutrální osy.

Závisí na poměru  $R/t$  – viz. tabulka, a poloměr ohybu neutrální osy je potom:

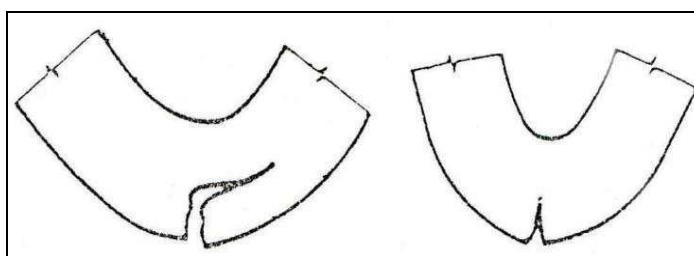
R/t	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1	1,2	1,5	2	3	4	nad5
x	0,23	0,29	0,32	0,35	0,37	0,38	0,39	0,40	0,41	0,42	0,44	0,45	0,46	0,47	0,5

**Tab 12** Hodnoty součinitele  $x$

$r = R + x \cdot t$ .....Vzorec pro výpočet poloměru ohybu

## 2.5. Další technologické problémy [3]

Kromě dříve uvedených a popsaných problémů, které byly deformace průřezu a odpružení materiálu. Dalšími problémy při ohýbání jsou praskání materiálu a tvoření vln. Praskání materiálu nastává v okamžiku, kdy dochází k překročení mezní hodnoty poloměru ohybu. Může být způsobeno zpevněním materiálu a průběhem vláken. Osa ohybu by měla být kolmá na směr vláken materiálu nebo minimálně pod úhlem  $30^\circ$  [3]. U dvojitého ohybu jsou vlákna materiálu v úhlu kolem  $45^\circ$  k ose ohybu. Polotovár vyrobený pomocí stříhání musí mít otřep na vnitřní straně ohybu nebo se pomocí broušení musí postarat o jeho odstranění.



**Obr 9** Porušení při ohýbání

Při navrhování ohýbaných součástí je nezbytné respektovat požadavky na hodnoty poloměrů ohybu. Poloměr ohybu musí mít minimální hodnotu takovou, aby se v krajních vláknech překročila hodnota meze kluzu. Pokud k tomuto nedojde, nevznikne plastická deformace. Poloměr nesmí však mít naopak příliš malou hodnotu. Deformace v krajních vláken nepřekročí hodnotu tažnosti. Z hlediska odpružení se má poloměr ohybu volit co nejmenší, ale vzhledem k tvárnosti a tloušťce materiálu co největší. Mohlo by dojít k destrukci v ohýbaném průřezu. Tenkostěnné materiály jsou náchylné ke vzniku vln. Tomuto jevu se dá zabránit pomocí bočního přitlačování materiálu k nástroji nebo dodatečné tahové síly při ohýbání.

## 2.6. Indukční ohřev

### 2.6.1. Princip [6]

Jedná se o ohřev elektricky vodivých objektů (nejčastěji jde o kov) za pomoci elektromagnetické indukce, kde jsou využívány vířivé proudy generované uvnitř kovu. Indukční ohřev se skládá z elektromagnetu, jehož prostřednictvím se vysokofrekvenční střídavý proud (AC) předává do materiálu. Frekvence střídavého proudu se používá v závislosti na velikosti objektu, typu materiálu, spojky (mezi

pracovní cívkou a objektem, který bude vyhříván) a hloubce vniku tepla. Jde o bezkontaktní ohřev. Vzhledem k tomu, že je tento ohřev bezkontaktní, nedochází ke kontaminaci materiálu, který je ohříván. Je také velmi účinný, protože teplo je skutečně vyrobené v obrobku. Toto může být porovnáno s jinými způsoby vytápění, kde je teplo z plamene nebo topný element, který je pak aplikován na obrobek. Z těchto důvodů indukčního ohřevu lze uplatnit na některé unikátní aplikace v průmyslu.

### **2.6.2. Hloubka průniku tepla [6]**

Největší intenzita indukčního proudu v obrobku se nalézá na povrchu a postupně klesá s navyšující se tloušťkou součásti. Až 80% tepla je se nalézá přímo na povrchu.

### **2.6.3. Popis principu zahřívání [6]**

Základní nastavení je AC napájení, které poskytuje elektřinu s nízkým napětím, ale s velmi vysokými proudy a vysoké frekvence. Obrobek je umístěn uvnitř cívky s řízeným napájením, obvykle v kombinaci s rezonančním kapacitorem ke zvýšení jalového výkonu. Střídavé magnetické pole indukuje vířivé proudy v obrobku. Vzniká teplo.



**Obr 10** Příklad indukčního ohřevu



## 2.7. Chlazení vodou

Chlazení vodou je metoda odstranění tepla z komponentu a průmyslových zařízení. Na rozdíl od chlazení vzduchem se voda používá jako vodič tepla. Vodní chlazení je běžně používané pro chlazení automobilových spalovacích motorů a pro velká průmyslová zařízení, jako jsou parní elektrárny, vodní generátory, ropných rafinérií a chemických provozech.

Výhody použití vodního chlazení místo vzduchového je v tom, že voda má vyšší měrnou tepelnou kapacitu, hustotu a tepelnou vodivost. To umožňuje pomocí vody přenášet teplo na větší vzdálenosti za menšího průtoku a snížením tepelného rozdílu.

## 3 Praktická část

Cílem analýzy, která je podkladem předložené zprávy je specifikovat silové účinky ohýbání trubek na exponované části kladkové ohýbačky pro různé materiály. Ohýbačka je koncipována jako tlačná s ohýbací kladkou; trubka je tlačena soustavou vodících kladek přes indukční ohřívací zařízení proti ohýbací kladce.

Analyzovaný materiál: :      11 353 – 960 °C s chlazením  
   11 523 – 960 °C s chlazením  
   12 022 – 920 °C bez chlazení  
   15 128 – 1050 °C bez chlazení

### 3.1. Teplota ohřevu.

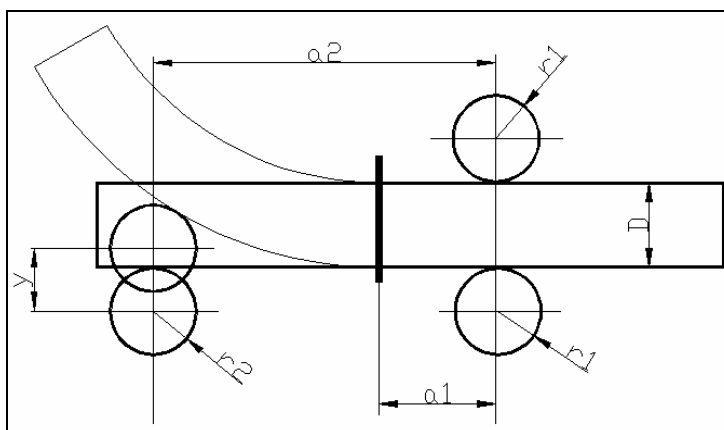
Doporučené teploty se pohybují těsně pod hranicí austenitizační teploty, podle chemického složení. Vyšší teploty na úrovni minimálních teplot ohřevu pro danou ocel se nedoporučují s ohledem na minimalizaci nadměrného poklesu tuhosti profilu a následné ztrátě stability tvaru. Doporučený rozsah: 705 ÷ 730 °C, max. 840 °C s následným chlazením. Teplota ohřevu je kontrolována dle podmínek pro jednotlivé druhy materiálu, uvedeno v úvodu, s korekcí na provozně měřené hodnoty cca 730 ÷ 840 °C.

### 3.2. Vstupní data a geometrie

Geometrický model ukazuje schéma rozložení a názvy klíčových elementů analýzy. Vodící a ohýbací kladka je simulována s prodloužením proto, aby dynamické zobrazení ohybu zůstalo neustále v obraze. Mírné rozšíření vodících kladek je provedeno kvůli simulaci indukčního ohřevu. Vzdálenost os vodících a ohýbací kladky je podélně 600 (mm) a příčně 79,5 (mm), v této hodnotě je zahrnuto i předpokládané odpružení po ohybu. Tvar ohýbané trubky je rovnoměrný oblouk dle nastavených technologických parametrů.

#### 3.2.1. Vedení trubky

Vodící kladky, jejich rozměry a tvar mají vliv na přesnost požadovaného oblouku. Na vývoj ovality mají vliv jen nepatrný.



Obr 11 Schéma kladkové ohýbačky trubek

#### 3.2.2. Technologie

Technologické uspořádání je patrné z obr. 1. Statický model vodících kladek, protože výpočetní systém FORM-2D je omezen na nerotační úlohy, byl doplněn o simulaci valivého tření. Výstupní hrany modelu vodících kladek simuluje indukční ohřev, popř. ohlazování. Ohýbací kladka je nastavována ve vodorovném směru podle žádaného poloměru ohybu o hodnotu.

### 3.3. Struktura relací – kontrolní (regulační), limitní

Analýzy ze vstupních, výstupních a verifikačních dat dle soupisu „Struktura požadavků na vstupní a výstupní data analýz“ budou podkladem k sestavení matic

relací s potřebnou vnitřní hustotou pro zabudování aproximačních funkcí závislosti na datech všech úrovní struktury.

## A Vstupy

$[X] \sim \{D, s, R, [K], T, v\} @ [K] \sim \{T, v\}$  – matice rozměrů a materiálových dat

<b>D</b>	– průměr trubky
<b>s</b>	– tloušťka stěny trubky
<b>R</b>	– poloměr oblouku
<b>T</b>	– teplota ohřevu
<b>v</b>	– rychlost posuvu
<b>[K]</b>	– matice materiálových dat
<b>[Sp(e, é, T)]</b>	– matice přetvárných odporů
<b>e(D, s, R)</b>	– deformace
<b>é(e, v)</b>	– rychlost deformace
<b><math>[\dot{\varepsilon}, \alpha, \lambda, c(T)]</math></b>	– modul pružnosti, teplotní roztažnost, tepelná vodivost, specifické teplo

## B Regulace

$[L, y, v, T] \sim \text{reg}([X], [\Delta])$  – 1. okruh

<b>L</b>	– ramena ohýbací kladky a induktoru
<b>y</b>	– vysunutí ohýbací kladky
<b>v</b>	– rychlost posuvu
<b>T</b>	– teplota ohřevu

$[R] \sim \text{reg}[L, y, v, T]$  – 2. okruh

C Limity: obě regulační matice limitní

1. okruh na maximu: částečná zpětná vazba

$[L, y, v, T]_{\max} \sim \lim([X], [\Delta], [F]_{\max}) @ [F]_{\max} \sim \lim[L, y, v, T]_{\max}$

2. okruh na minimu:

$[R]_{\min} \sim \lim[L, y, v, T, F]_{\max}$

$[\Delta] \sim \{D, s, R\}$  – matice rozměrových a tvarových tolerancí

Pozn.:

1. „Struktura relací“ je první náčrt, mapa projektu k diskusi.
2. Soupis je možná předčasný, ale může být kostrou popisu realizace projektu
3. Regulační a zejména limitní matice relací budou tvořit teoretickou částí přínosu projektu.

### **3.3.1. Struktura požadavků na vstupní a výstupní data analýz**

Struktura požadovaných dat pro analýzy prováděné skupinou spolupřímce VŠB –TUO je rozdělena do dvou hlavních skupin. Vstupní data pro vlastní nastavení a provedení výpočtů a vybraná data pro verifikaci výstupů analýz. Výstupní a verifikační data musí korelovat s parametry **kontrolními** pro monitoring a řízení stroje. Tento soupis slouží jako podklad pro vymezení možností postupu a rizik proveditelnosti projektu. Data pro kontrolu vývoje přetvárných odporů a pružně plastických parametrů polotovarů bude úkolem skupiny VŠB-TUO. Označení kontrolních parametrů je nadále otevřené.

#### **A Vstupní data**

##### **1 Rozměrové schéma stroje**

1.1 Rozměry a polohy základních částí stroje

1.2 Rozměry, poloha a rozsah nastavení hlavních funkčních částí stroje

Tvar a rozměry tlačného trnu

Tvar a rozměry vodících a ohýbacích kladek

Rozměry a rozsah vzdáleností induktoru a vodících kladek

Rozměry a rozsah vzdáleností chladicího členu a induktoru

Schéma a rozsah pohybu tlačného zařízení a ohýbací kladky v celém rozsahu ohybu

1.3 Způsob polohování funkčních částí pro přesnější identifikaci dynamiky procesu

Druh pohonu tlačného zařízení a ohýbací kladky

Limity rychlosti pohybu tlačného zařízení a ohýbací kladky v celém rozsahu ohybu

##### **2 Materiály a rozměry polotovarů v cílové skupině**

2.1 **Materiály** ohýbaných trubek – variantně značky, čísla, normy nebo ekvivalenty

2.2 Stav a provedení

Tepelné zpracování – normativ

Svařované, celistvé

2.3 Rozměry trubek – **průměr a tloušťka stěny**

2.4 **Teplota** a režim ohřevu a chlazení

2.5 Parametry 2.1 – 2.4 s vyloučením nepožívaných variant

**B Výstupní, verifikační data** (cílové parametry a provozní výsledky)

**3 Technologické parametry** (dle materiálových, rozměrových a technologických kombinací)

3.1 **Poloměry ohybu** pro kombinace polotovarů cílové skupiny

3.2 Rozměry nastavování ohýbací kladky – **rameno, vysunutí kladky a rychlosti**

**4 Silové poměry**

4.1 Síla působící na tlačné zařízení

4.2 Síla působící na vodící kladky

4.3 Síla působící na ohýbací kladku

4.4 Měření sil, pokud to bude možné, na omezené, vybrané skupině variant

**5 Výstupní, kvalitativní parametry**

5.1 **Ovalita** v závislosti na dosažitelných minimálních poloměrech ohybu

5.2 Výsledný tvar a rozměry oblouku

5.3 **Odchyłky tvaru, deformace** povrchu a průřezu

5.4 Dokumentace, kontrola **polohy/posunutí** tělesa oblouku, zejména v **kontaktech**

<b>Přetvárný odpor</b>					<b>Sp (MPa)</b>
<b><math>Sp = So \cdot A1 \cdot \exp(-m1 \cdot T) \cdot A2 \cdot e^{m2} \cdot A3 \cdot \epsilon^{m3}</math></b>					
<b>konst.</b>	<b>11353</b>	<b>11378</b>	<b>11523</b>	<b>12022</b>	<b>15128</b>
So (MPa)	78,4	102,7	100,4	78,2	134,7
A1	12,231	12,231	18,170	12,231	14,586
m1	0,0025	0,0025	0,0028	0,0025	0,0027
A2	1,494	1,494	1,516	1,494	1,629
m2	0,174	0,174	0,181	0,174	0,212
A3	0,726	0,726	0,750	0,726	0,726
m3	0,139	0,139	0,124	0,139	0,139
<b>k</b>	2,940	2,244	1,800	2,947	1,828

**Tab 13** Přetvárné odpory jednotlivých ocelí

### **3.4.Použitý software**

#### **3.4.1. Hlavní oblasti použití [4]**

Jeho název je složen ze slov **Q**uick **M**etal **F**orming Simulation. QFORM3D software byl vyvinut v roce 2002 QuantorForm s.r.o. a jedná se o rozšířenou verzi QFORM2D. Tento software kombinuje 2D a 3D simulace a ponechává si jednoduché rozhraní od QFORM2D. Pro 3D simulace stačí vybrat "model pevného tělesa" pro nastavení obrobku jako původní oblast geometrických dat. QFORM3D se používá pro simulaci horkých, vady, identifikuje rozložení teplot a vypočítává zatížení a spotřebu energie pro teplých a studených tvářecích procesů. Software dokáže předpovídat tok materiálu, vyvolání potřebné deformace. Mohou jej také efektivně využívat studenti a pracovníci v oddělení tváření. Program je snadno spustitelný na průměrném PC.

#### **3.4.2. Historie softwaru [4]**

Byl vyvinut pro rozvoj zpracování kovových tlakových technologií. Je zapotřebí ovšem vědět, jak správně vypočítat potřebné síly, přirozené proudění kovu, napětí a deformace jak v kované části tak i ve tvářícím nástroji. QForm byl navržen a vyvinut tak, aby jej přímo mohli používat inženýři ve výrobní sféře. Prof. G.Ya. Gun a jeho kolegové byli u vzniku tohoto simulačního programu určeného pro tváření kovů. Měli přístup na Ústav Moskevské oceli a slitiny. Na programu společně pracovali již od začátku sedmdesátých let. Tyto práce byly dále rozvíjeny, při navrhování počítačového programu pro takové procesy jako byly např. válcování, protlačování a kování.

#### **3.4.3. Vlastnosti [4]**

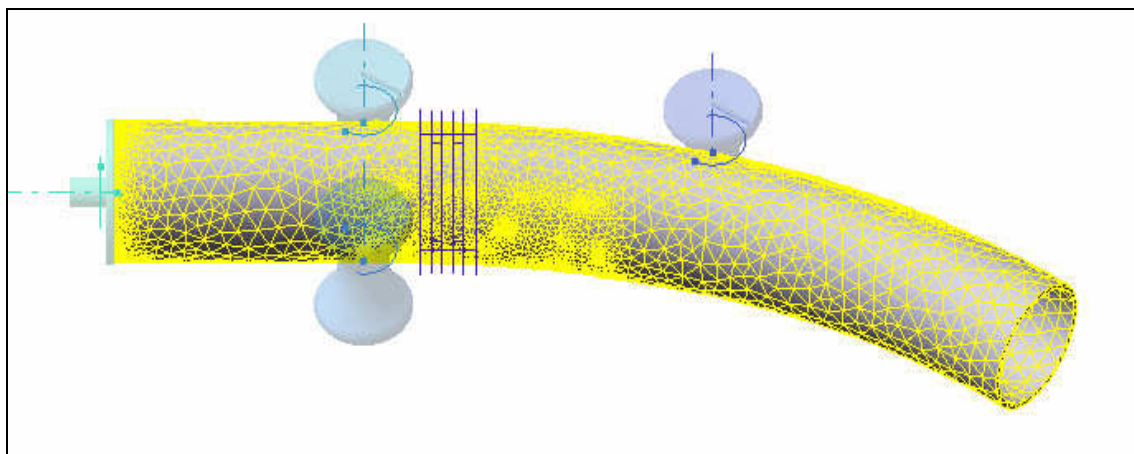
QFORM3D kombinuje 2D a 3D simulace v jednom balíku softwaru, který poskytuje obrovské výhody pro uživatele. Pomocí tohoto programu je možné simulovat tvářecí proces a není nutno proto provádět nákladné pokusy a výzkumy. QForm je praktický a velice účinný simulační nástroj. Tento software má udržet širokou funkčnost a snadné použití jeho předchůdce 2D. Jediná věc nutná pro převod do 3D simulace je vybrat "model pevného tělesa" pro nastavení obrobku, místo 2D kříž-sekční kontury potřebné pro 2D. Všechny ostatní údaje jsou uvedeny ve stejném

módu jak pro 2D simulace. Je zde také Průvodce minimalizování pravděpodobnosti chyb při zadávání dat. Integraci 2D a 3D simulací ve stejném softwarovém balíčku poskytuje jedinečnou příležitost efektivně simulovat procesy skládající se z několika tvářecích procesů, z nichž první je osově symetrický a lze vyřešit rychle v 2D prostředí (např. pěchování) a následné procesy, které vyžadují úplné měřítko 3D simulace. Objektově orientovaná struktura softwaru vytváří velmi pohodlné a plně integrované uživatelské prostředí. Přípravu dat je možné vizuálně sledovat a výpočet jej doprovázet současným grafickým zobrazením výsledků. QFORM3D je účinným nástrojem pro počítačové hodnocení procesu, který je mnohem úspornější a rychlejší než ladění technologie "pokus, omyl". Software podporuje import IGES a STEP souborů, které zamezují ztrátě přesnosti typické pro soubory ve formátu STL používanými jinými simulačními balíčky. Povrch modelu vytvořil PowerSHAPE (Delcam Plc). Použití plné a přesné geometrie obrobku jako počáteční data a také za použití odborné znalosti nelineární aproximace pro řešení 2D úloh. QFORM3D byl první komerční software, který využívá metody kvadratický konečných prvků s cílem vyřešit problémy ve 3D. To umožnilo značné zvýšení přesnosti řešení, snížení ztrát objemu a vysokou spolehlivost a jistotu řešení pro určité typy tvářecích procesů. Popis povrchů pomocí nelineární metody konečných prvků umožňuje modelu přeměňování. Použité metody v aplikaci QForm byly průběžně ověřeny v praxi i mezinárodními zkouškami. Objem vstupních dat je omezen na maximální minimum.

V současné době se QForm prodává v těchto světových jazycích: anglicky, čínsky, italsky, německy, španělsky, rusky a polsky.

### **3.5. Výsledky výpočtů**

Výpočet byl proveden jak klasicky i metodou MKP pro zadané pole rozměrů trubek a materiálů. Zohledněny byly i provozní parametry ohýbacího zařízení, tedy shodné se zadáním z roku 2000 (viz zpráva „Limity ohýbání trubek za tepla“). Analýza MKP probíhala na geometrickém modelu odpovídajícím Obr. 11. Geometrie modelu byla určena délkou výstupního oblouku, který je 15°. Při analýze byly pořízeny obrazové výstupy hlavních veličin: efektivní deformace (Obr. 15, Obr. 16), přetvárný odpor (Obr. 17, Obr. 18) a teplota při ohybu (Obr. 19, Obr. 20). Obrazové výstupy jsou pro lepší představivost provedeny pro zadaný úhel.



**Obr 12** Celkový pohled s obrysovými prvky

### 3.5.1. Ovalita

Tento efekt je možné sledovat pomocí koeficientu ovality  $K_o$ , který hodnotí změnu kruhového průřezu v eliptický tvar [5].

Koeficient ovality lze vypočítat ze vztahu:

$$2) \quad K_o = \left[ \frac{D_{MAX} - D_{MIN}}{D} \right] \cdot 100 = \left[ \frac{381,519 - 373,345}{377} \right] \cdot 100 = 1,637$$

Jde o smluvní vyjádření ovality dle technických předpisů. Přípustné hodnoty zploštění se kontrolují průchodem normované kuličky. Zplošťování trubek je možné do určité míry potlačit užitím výplní.

$$3) \quad D_{\min} = d_{1,2} + t_1 + t_2 = 336,416 + 19,756 + 19,173 = 375,345 \text{ mm}$$

$$4) \quad D_{\max} = d_{3,4} + t_3 + t_4 = 349,894 + 15,922 + 15,703 = 381,519 \text{ mm}$$

Hodnoty (mm)	Průměr na vstupu, v místě induktoru	Průměr uprostřed oblouku	Průměr na konci oblouku
Vodorovně	375,184	371,824	375,878
Svisle	381,450	379,259	375,471

**Tab 14** Hodnoty průměrů během ohýbání

Jedná se o orientační rozměry, protože síť prvků, které se adaptivně výrazně mění k velikosti prvků rozměry zkreslují.



Rozměry reprezentantů přesně udávají, že se jedná o ohyb tenkostěnných trubek (poměr  $D/s > 25$ ). Nejčastěji se ohýbají tenkostěnné trubky za pomoci vřetena a to jak tuhý nebo složený ze segmentů. Aby ohýbání probíhalo bezpečně bez použití vřetena jsou uváděna různá doporučení. Tyto doporučení plně vyhovují pro ohyb za studena a sledují překročení meze borcení průřezu podél vnitřního vlákna oblouku trubky. Pro ohyb za tepla je nutné akceptovat vliv poklesu tuhosti ohýbaného profilu s rostoucí teplotou. Proto minimální poloměr ohybu je dán vztahem:

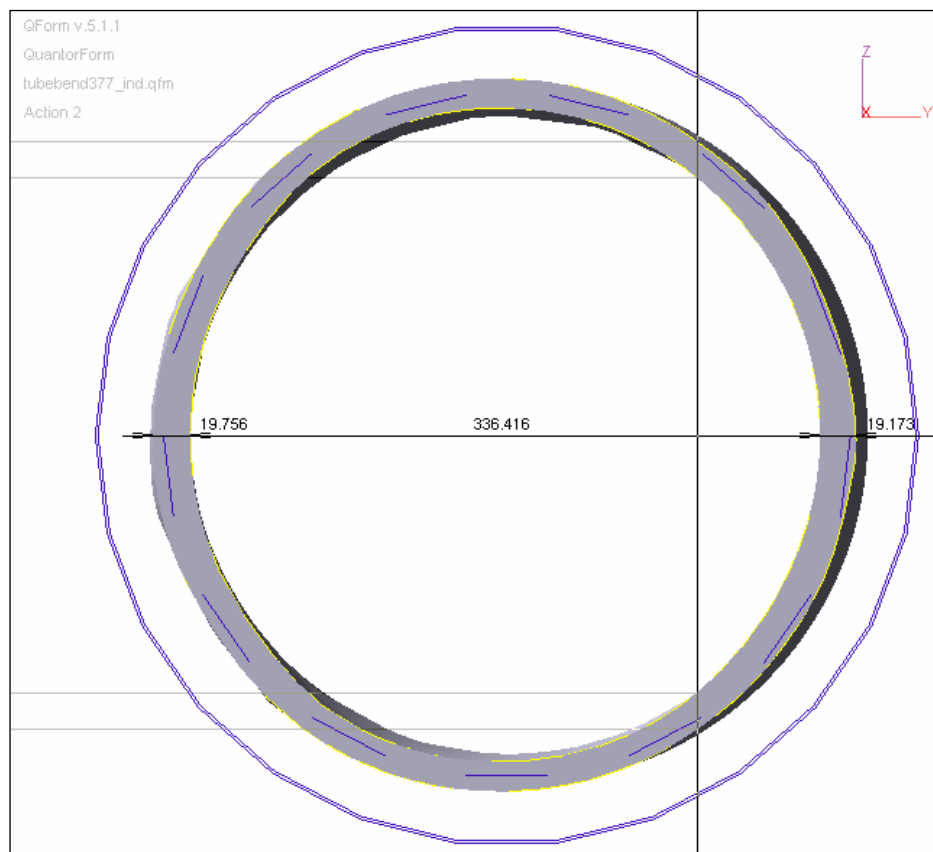
$$5) \quad R_{\min} \geq 4 \cdot k \cdot (D - s) \quad [11]$$

kde koeficient  $k$  je pro ohyb za studena v rozmezí  $0,7 \div 1$ . Pro ohyb za tepla je doporučován min. 1,8. Vliv chemického složení na koeficient  $k$  lze zanedbat. Za předpokladu, že bude dodržena teplota ohřevu v blízkém okolí austenitizační hranice. Při volbě teploty ohřevu vyšší než doporučené, např. s ohledem na výrobní podmínky, lze koeficient  $k$  přesněji specifikovat pro materiály zadaných reprezentantů (tab. 15). [12]

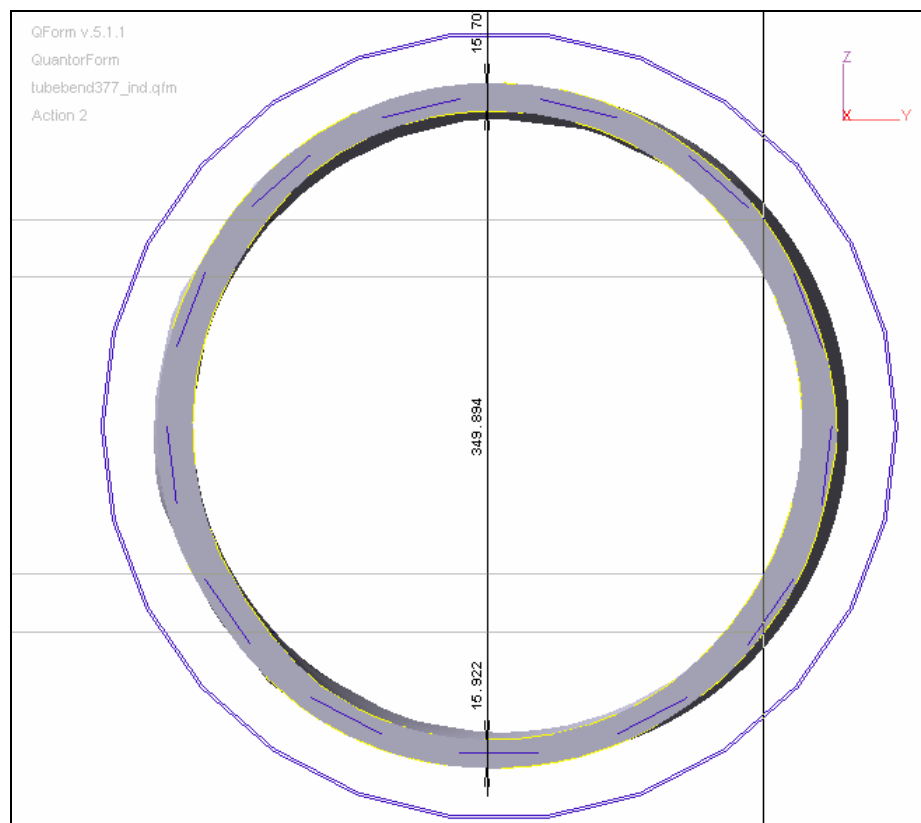
$k$	$T$		$^{\circ}\text{C}$	
materiál	730	730	960	1 050
11 523	1,80	2,10	2,37	2,59
11 378	2,24	2,52	2,75	2,93
15 128	1,83	2,10	2,34	2,53

**Tab 15** Přesnější specifikace [12]

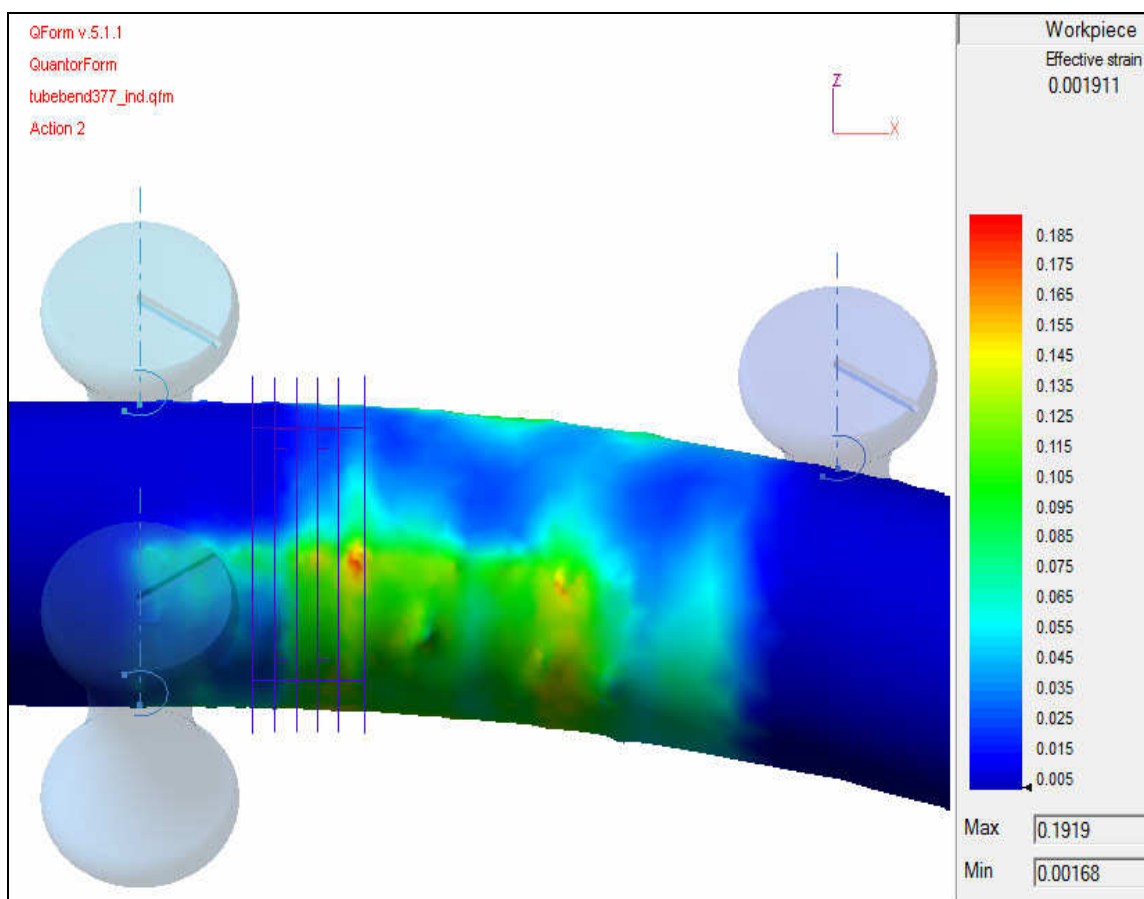
Uvedená doporučení neodstraní úchylku tvaru naprosto přesně, pouze jí zmírní na únosnou mez. Další eliminace je možná použitím vnitřní výplně (písek, vřeteno), ale opět účinek nebude stoprocentní.



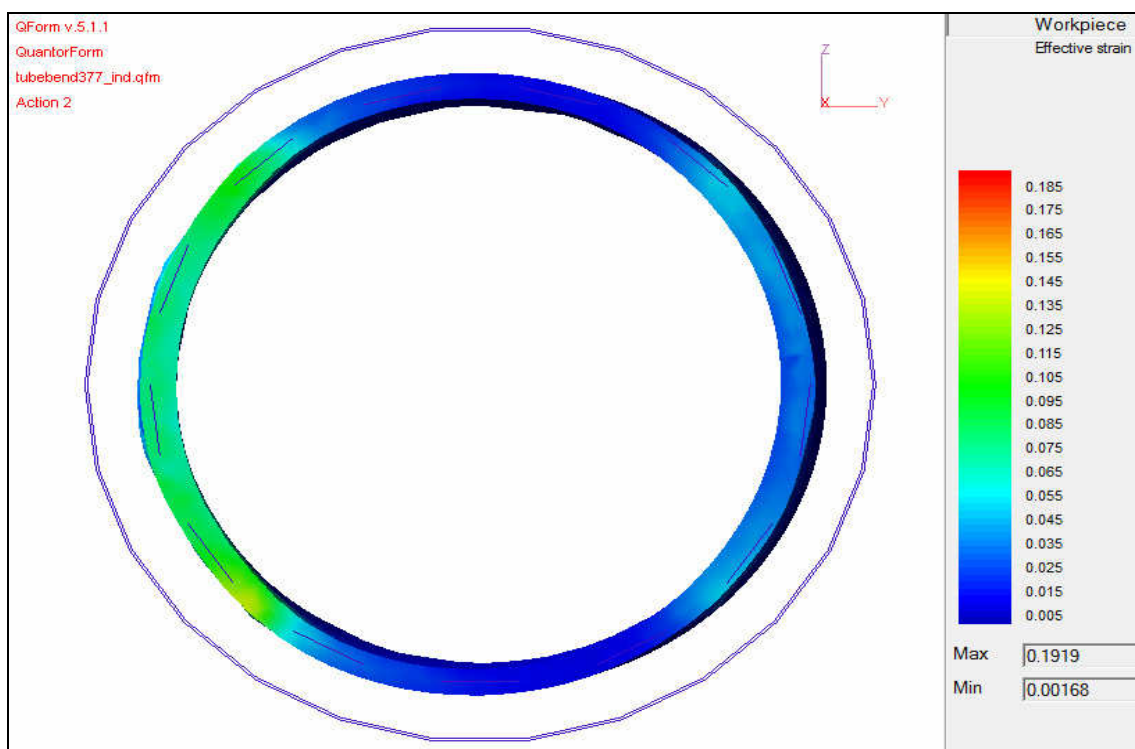
**Obr 13** Nejmenší průměr



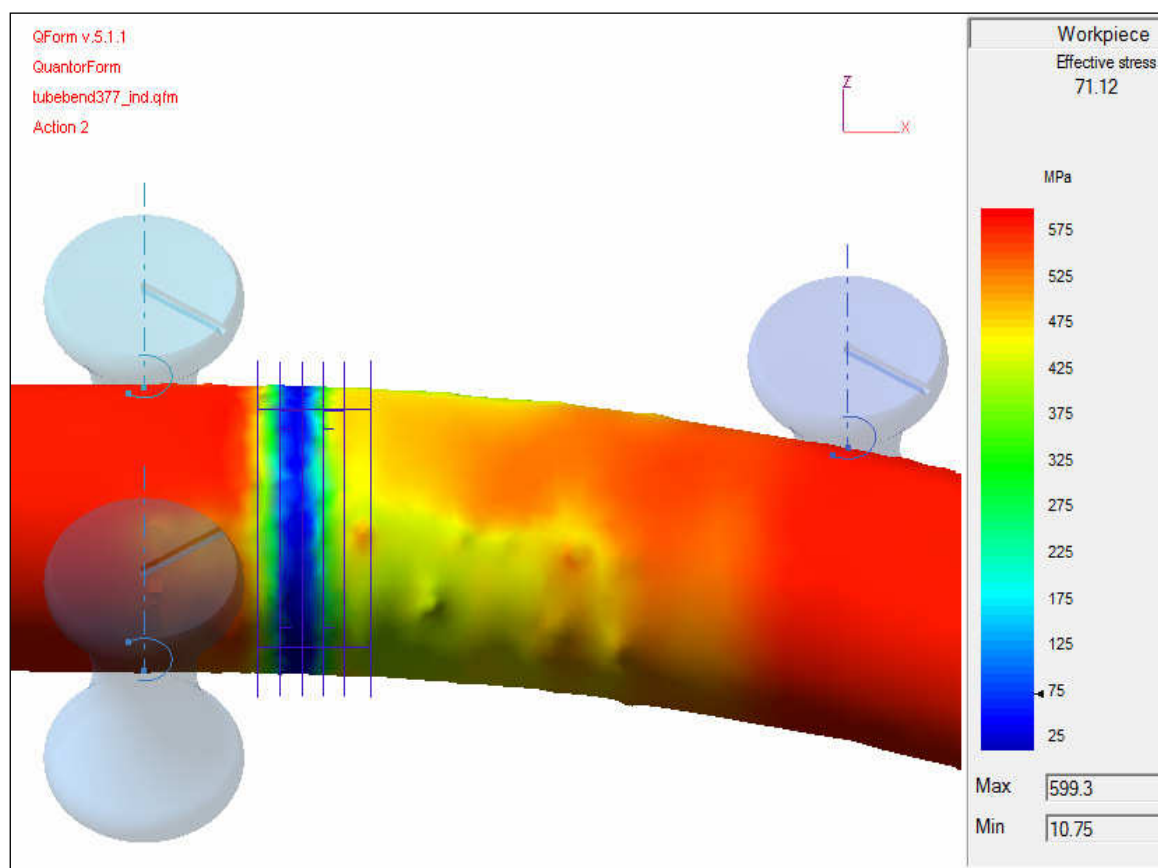
**Obr 14** Největší průměr



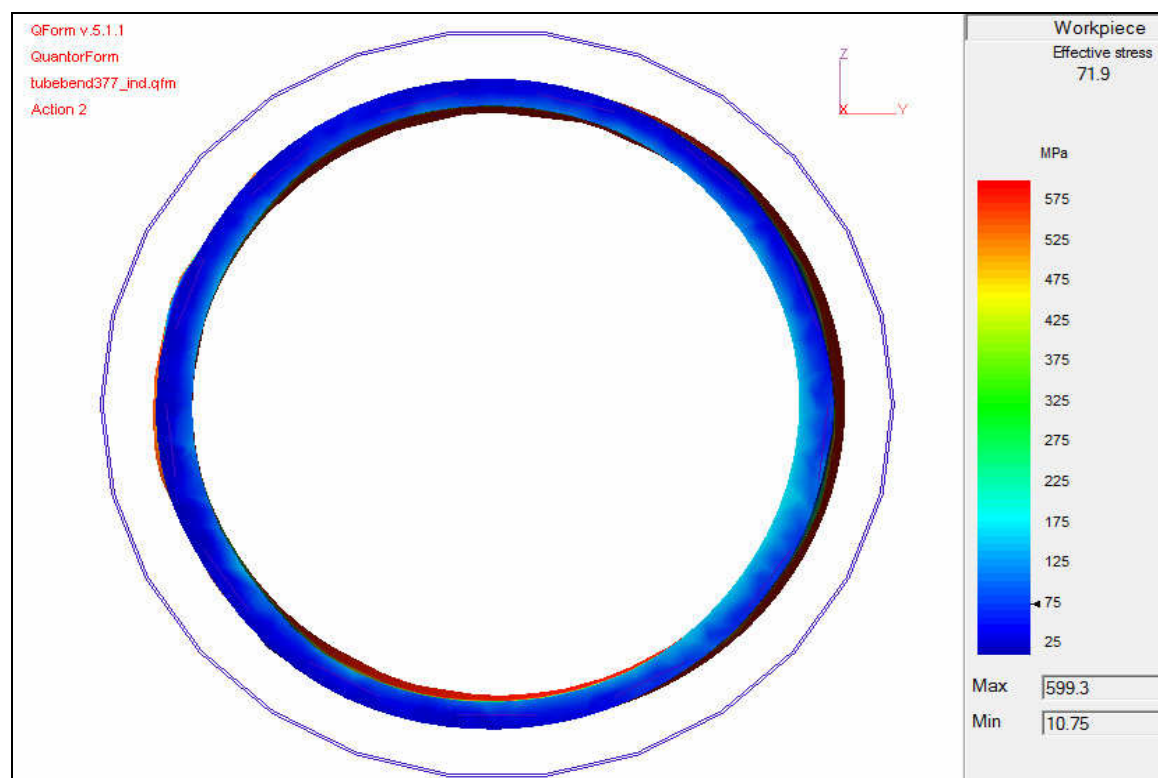
**Obr 15** Celkový pohled na efektivní deformace



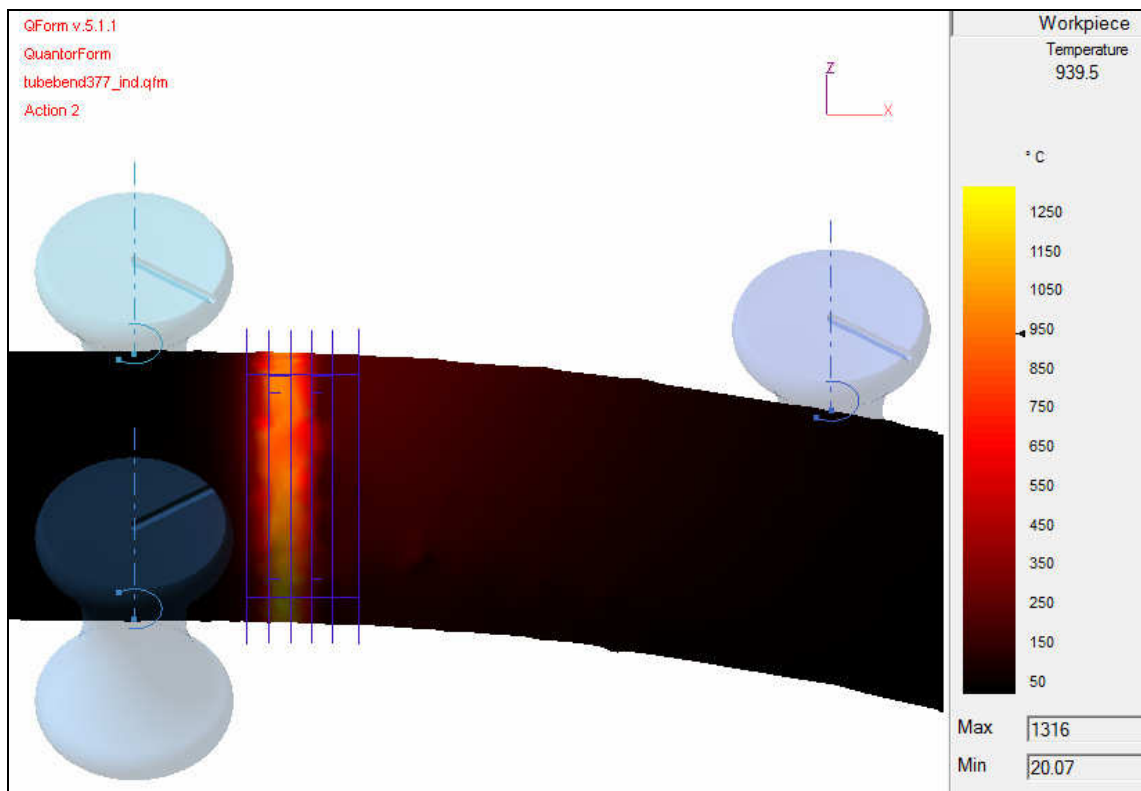
**Obr 16** Efektivní deformace v řezu



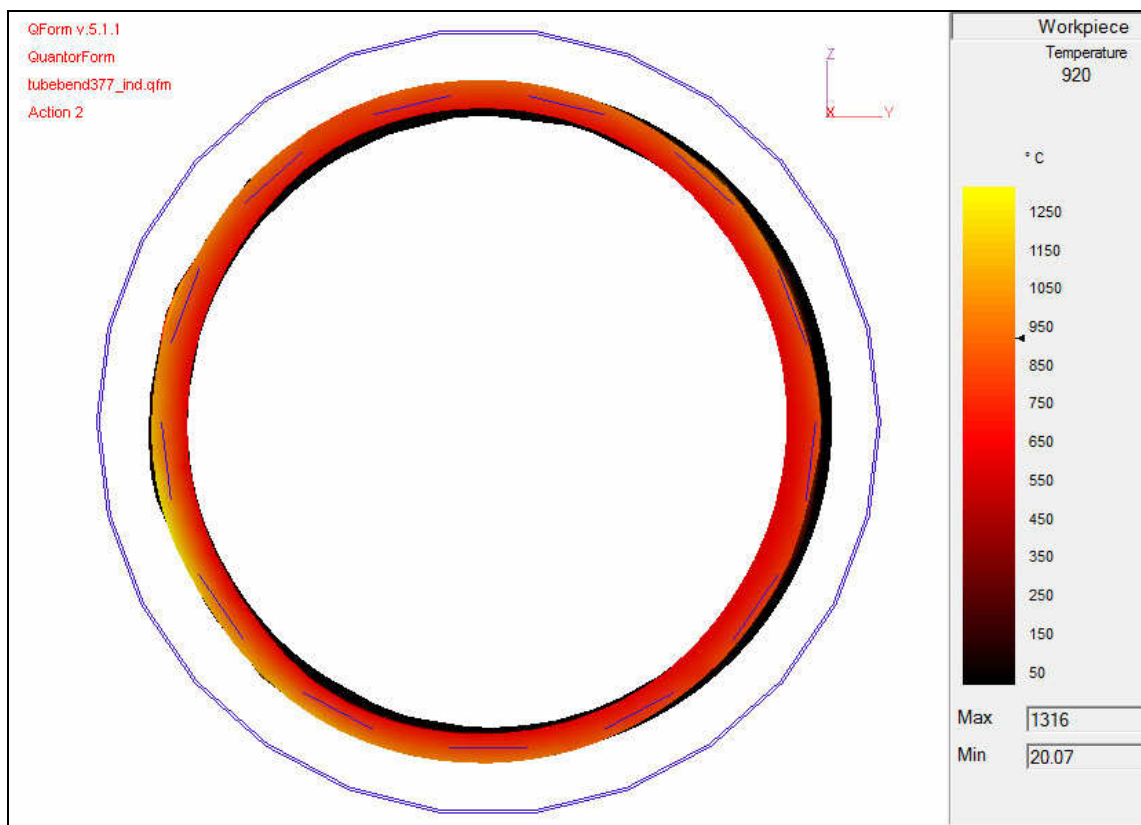
**Obr 17** Celkový pohled na přetvárný odpor



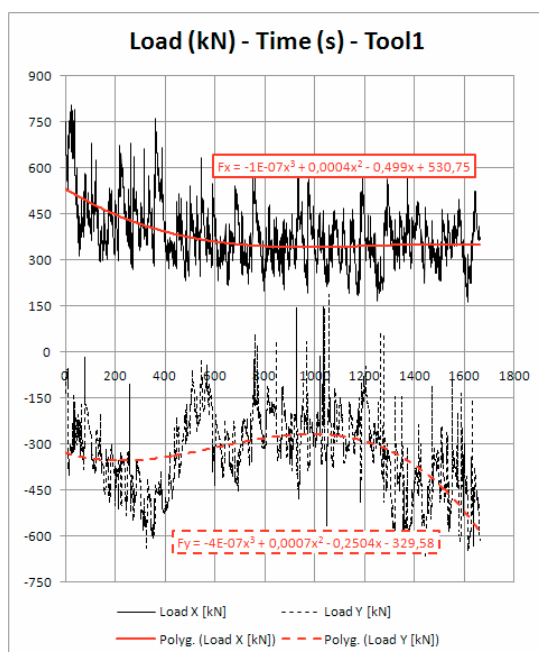
**Obr 18** Přetvárný odpor v řezu



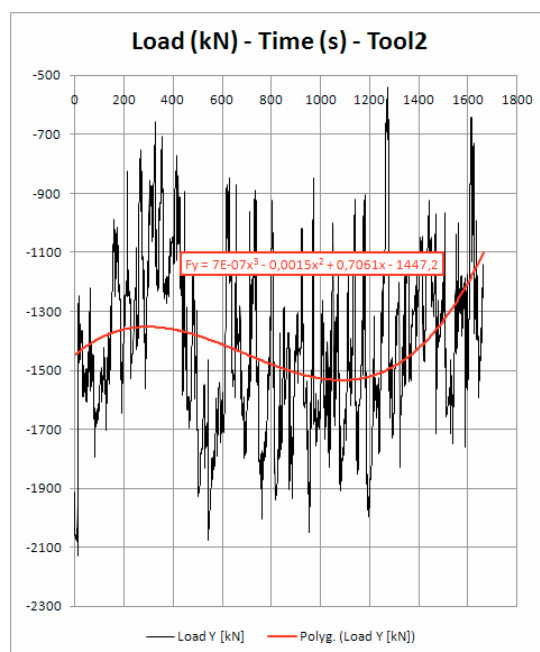
**Obr 19** Celkový pohled na indukční ohřev



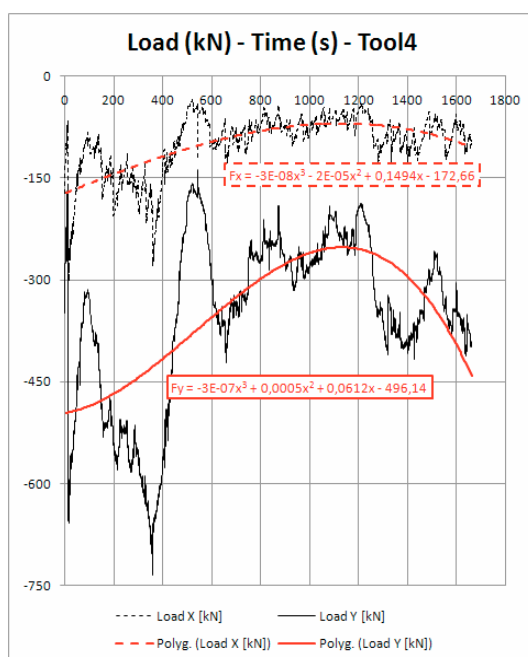
**Obr 20** Teplo v místě ohřevu



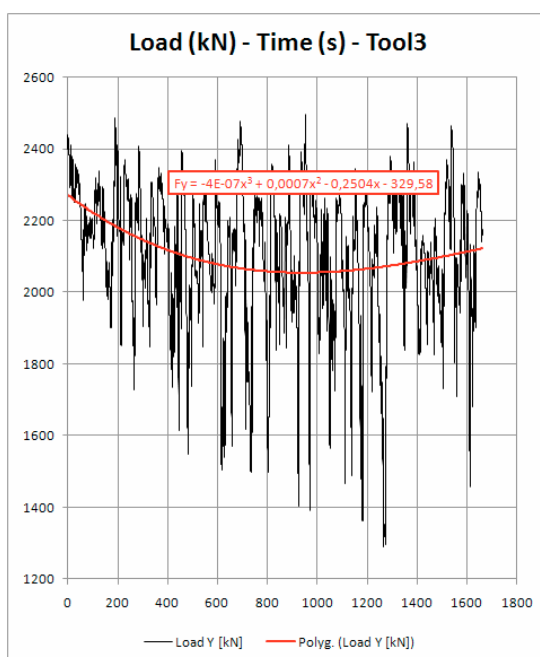
**Graf 1** Závislost síly na čase  
na tlačném nástroji



**Graf 2** Závislost síly na čase  
1. kladce



**Graf 3** Závislost síly na čase  
na 2. kladce



**Graf 4** Závislost síly na čase na 3.  
na 3. kladce

## Závěr

Bakalářská práce byla vytvořena za účelem porovnání a kontroly limit technologických procesů v oblasti ohýbání trubek. V teoretické části se zabývám rozбором materiálů a technologiemi ohýbání trubek jak za studena a v režimu lokálního ohřevu.

V praktické části jsem se zaměřil na sledování materiálových vlastností a technologických parametrů při procesu ohýbání s lokálním indukčním ohřevem pro daný rozměr a materiál polotovaru. Vlastnosti materiálu a rozměrové změny byly sledovány ve spojitosti s limitními technologickými parametry procesu ohýbání v kladkách s volným koncem.

K sestavení limitních parametrů pro ohýbání je třeba stanovit si hodnoty pro výchozí výpočet. Jedná se např. o minimální poloměr ohybu, teplotu indukčního ohřevu a režimu následného ochlazování vodním proudem, technologické parametry ohýbacího stroje a samozřejmě mechanické vlastnosti materiálu ohýbané trubky. Po sestavení a stanovení limitních parametrů bylo zapotřebí použití speciálního softwaru, za pomoci kterého byly jak početně tak i vizuálně určena výsledná data. Výpočet v tomto softwaru je časově i hardwarově značně náročný.

Závěrečná část byla zaměřena na sledování zatížení jednotlivých funkčních komponent: tlačné zařízení, vodící a ohýbací kladky v závislosti na vývoji tvorby potrubního oblouku. S ohledem na rozměrové limity byly vyhodnocovány odchylky kruhovitosti v různých částech ohybu.

Složitost technologického procesu ohybu s indukčním ohřevem a komplikovaným vazbám jednotlivých materiálových a technologických parametrů společně s kontrolou jejich limit, bude vyžadovat parametrické numerické řízení celého komplexu zařízení.

## Seznam obrázku a tabulek

Obr 1	<b>Rozdělení a značení ocelí</b>	8
Obr 21	<b>Schéma ohýbání</b>	15
Obr 3	<b>Ohýbání trubky v přípravku</b>	17
Obr 4	<b>Navíjení trubky osovou tlakovou silou s ohřevem</b>	18
Obr 5	<b>Protlačování</b>	19
Obr 6	<b>Odpružení při ohybu</b>	21
Obr 7	<b>Deformace průřezu během ohýbání pro rozdílné výšky a profily</b>	22
Obr 8	<b>Posunutí neutrální osy v místě ohybu</b>	22
Obr 9	<b>Porušení při ohýbání</b>	23
Obr 10	<b>Příklad indukčního ohřevu</b>	24
Obr 11	<b>Schéma kladkové ohýbačky trubek</b>	26
Obr 12	<b>Celkový pohled s obrysovými prvky</b>	32
Obr 13	<b>Nejmenší průměr</b>	34
Obr 14	<b>Největší průměr</b>	34
Obr 15	<b>Celkový pohled na efektivní deformace</b>	35
Obr 16	<b>Efektivní deformace v řezu</b>	35
Obr 17	<b>Celkový pohled na přetvárný odpor</b>	36
Obr 18	<b>Přetvárný odpor v řezu</b>	36
Obr 19	<b>Celkový pohled na indukční ohřev</b>	37
Obr 20	<b>Teplo v místě ohřevu</b>	37
Tab 1	<b>Charakteristika ocelí 10 – 19</b>	9
Tab 2	<b>Chemické složení % (11 353)</b>	11
Tab3	<b>Mechanické vlastnosti (11 353)</b>	11
Tab 4	<b>Chemické složení % (11 523)</b>	12
Tab 5	<b>Celkový pohled na indukční ohřev</b>	12
Tab 6	<b>Mechanické vlastnosti (11 523)</b>	13
Tab 7	<b>Chemické složení % (11 378)</b>	13
Tab 8	<b>Mechanické vlastnosti (11 378)</b>	13
Tab 9	<b>Mechanické vlastnosti (12 050)</b>	14
Tab 10	<b>Chemické složení % (12 050)</b>	14
Tab 11	<b>Mechanické vlastnosti (15 128)</b>	14
Tab 12	<b>Hodnoty součinitele <math>\alpha</math></b>	22
Tab 13	<b>Přetvárné odpory jednotlivých ocelí</b>	29
Tab 14	<b>Hodnoty průměrů během ohýbání</b>	32
Tab 15	<b>Přesnější specifikace</b>	33



## Použitá literatura

- [1] MOHYLA, M. *Strojírenské materiály: díl 1*. 2. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava editační středisko, 2006. ISBN 80-248-0270-8.
- [2] JKZ Bučovice a.s. - *Konstrukční ocel 11 523* [online]. 2011 [cit. 8.4.2011]. <http://www.jkz.cz/cs/printpdf/produkty/konstrukcni-ocel-11-523>.  
Dostupné z : <<http://www.jkz.cz/>>.
- [3] *Technologie plošného tváření – ohýbání*. [online]. Liberec: Technická univerzita Liberec, Fakulta strojní, 2008-26-11 (PHP). [cit. 2-3-2012]. [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/07.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/07.htm).  
Dostupný z: <<http://www.ksp.tul.cz/>>.
- [4] QuantorForm. *Products* [online]. Moskva, QuantorForm. [cit. 4-2-2012]. <http://www.qform3d.co.uk/?go=21>.
- [5] HRUBÝ, J. *Technologie ohýbání a zkružování* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 16-4-2001 (PDF). [cit. 10-11-2011]. [http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Texty/Bending\\_II.pdf](http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Texty/Bending_II.pdf).  
Dostupné z: <<http://www.345.vsb.cz/>>.
- [6] Danyk.ws.cz. *Indukční ohřev* [online]. 12-4-2011. [cit. 5-3-2012].  
Dostupné z: <<http://danyk.wz.cz/induk.html>>.
- [7] Solil, P. *Technologie pro ohýbání tenkostěnné trubky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2009. 44s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Milan Dvořák, CSc  
[http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=1785](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=1785)  
8. Dostupné z: <<http://www.vutbr.cz/>>.

- [8] ArcelorMittal Frýdek-Místek a.s., *Mechanické vlastnosti a chemické složení*.  
[online]. [cit. 20-4-2012].  
[http://www.valcovna-nh.cz/download/cz/03\\_cz.pdf](http://www.valcovna-nh.cz/download/cz/03_cz.pdf).  
Dostupné z: <<http://www.valcovna-nh.cz/>>
- [9] *Materiály* [online]. [cit. 8-3-2012]. / <http://www.tumlikovo.cz/rozdeleni-konstrukcnich-oceli-a-jejich-charakteristiky>  
Dostupné z: <<http://www.tumlikovo.cz/>>.
- [10] ČSN EN 100 25 ( 420904). *Dokumentace - Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí*. [online]. [cit. 10-2-2012].  
[http://www.splav.kharkov.com/steelgrade/mat\\_start\\_eu.php?name\\_id=2](http://www.splav.kharkov.com/steelgrade/mat_start_eu.php?name_id=2)  
Dostupné z: <<http://www.splav.kharkov.com/main.php>>.
- [11] ČABELKA, J. a kol. *Mechanická technológia*. Bratislava: VSAV, 1967.  
s.594÷599
- [12] HENZEL, A. SPITTEL, T.. *Rasčet energosilových parametrov v processach obrabotki metallov davleniem*. Moskva: metallurgia, 1982. 73s.